

TADEUSZ ROBAKOWSKI

Instytut Spawalnictwa

NIEKTÓRE PROBLEMY WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ZŁĄCZ
I ELEMENTÓW SPAWANYCH

Z każdym rokiem wzrasta zakres prac spawalniczych w produkcji nowych konstrukcji. Wprowadza się do przemysłu w coraz to większym zakresie spawanie automatyczne łukiem krytym, spawanie w osłonie CO_2 , spawanie w osłonie argonu, zwiększa się zakres półautomatycznego i automatycznego cięcia tlenem. Wzrastający ciągle zakres spawania w konstrukcjach stwarza konieczność prowadzenia obszernych badań wytrzymałościowych, tensometrycznych i zmęczeniowych złączy wykonanych różnymi metodami, a także elementów oraz całych konstrukcji w celu ustalenia ich trwałości i zastosowania najlepszych rozwiązań konstrukcyjnych.

Od kilku lat prowadzone są w Instytucie Spawalnictwa badania zmęczeniowe elementów spawanych ze stali konstrukcyjnych niskowęglowych, stali o podwyższonej wytrzymałości i stopów aluminium. Prowadzone są również badania zmęczeniowe ram motocyklowych, wałów pędnych, węzłów spawanych itp.

Z uzyskanymi wynikami, urządzeniami i możliwościami badań chciałbym kolegów zapoznać w niniejszym referacie.

Złącza spawane stosowane w różnych konstrukcjach wykazują bardzo wyraźną nieciągłość przekroju. Powoduje ona w spawanym elemencie zaburzenia w przebiegu linii sił, głównie przez ostre ich odchylenie, zwężenie, częściową przerwę, a także zmianę budowy strukturalnej. Niszeduże nawet odchylenie w przebiegu linii sił prowadzi do spiętrzenia naprężeń i obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej.

W rozważaniach nad zagadnieniem wytrzymałości zmęczeniowej połączeń spawanych, punktem wyjścia jest złącze doczołowe ze stali St3S wykonane w pozycji podolnej z podpawaniem grani, prześwietlone, bez żadnych wad wewnętrznych. Wytrzymałość zmęczeniowa takiego złącza przy obciążeniach pulsujących wynosi $R_{z0}^+ = 16-18 \text{ kg/mm}^2$. Pomimo łagodnego przebiegu linii sił, przełom zmęczeniowy występuje zawsze w przejściu

spoiny do materiału rodzimego. Przez usunięcie nadlewu spoiny za pomocą obróbki mechanicznej uzyskuje się wyższą wytrzymałość zmęczeniową złącza $R_{zo}^+ = 22-23 \text{ kG/mm}^2$.

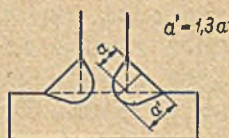
Pomimo wysokiej wartości wytrzymałości zmęczeniowej złącza z obrobionym nadlewem w konstrukcjach spawanych obciążonych siłami zmiennymi bardzo rzadko stosuje się obróbkę mechaniczną spoin, przede wszystkim z uwagi na pracochłonność i trudności produkcyjne.

Duży spadek wytrzymałości zmęczeniowej zachodzi w złączu krzyżowym. Najbardziej niebezpiecznym miejscem o silnej koncentracji naprężeń, a równocześnie początkiem złomu zmęczeniowego jest karb w grani spoiny. Wytrzymałość zmęczeniowa złącza krzyżowego odniesiona do przekroju spoin wynosi $R_{zo}^+ = 6-7 \text{ kG/mm}^2$. Przy zwiększeniu grubości spoin, przełom zmęczeniowy zachodzi w ich przejściu do materiału rodzimego, a wytrzymałość zmęczeniowa odniesiona do przekroju pręta wynosi $R_{zo}^+ = 9-10 \text{ kG/mm}^2$.

Wytrzymałość zmęczeniowa połączeń spawanych zależy w dużym stopniu od pozycji spawania. Złącza wykonywane w pozycjach: pionowej, naściennej i pułapowej posiadają nieco niższą wytrzymałość zmęczeniową od złącza wykonywanych w pozycji podolnej, ponieważ w pozycjach przymusowych istnieje większa możliwość powstawania wad podczas spawania.

Złącza spawane wykonane ręcznie metodą łukową jak i gazowo, posiadają prawie taką samą wytrzymałość zmęczeniową. Przy spawaniu automatycznym pod warstwą topnika zostaje wyeliminowany wpływ spawacza na jakość spoiny. Przeprowadzone badania złącza spawanych automatycznie łukiem krytym wykazały, że wytrzymałość zmęczeniowa złącza doczołowych zależy od wysokości nadlewu, a w związku z tym od działania karbu w przejściu spoiny do materiału rodzimego. Wartość wytrzymałości zmęczeniowej jest jednak taka sama jak złącza wykonanych ręcznie metodą łukową. Podobne wartości uzyskuje się dla złącza spawanych wykonywanych w osłonie CO_2 .

Przy spawaniu automatycznym spoin pachwinowych, a także przy zastosowaniu elektrod głęboko wtapiających, wtopienie w grani złącza jest większe w porównaniu do spoiny wykonanej ręcznie (rys.1). Przy uwzględnieniu rzeczywistego wymiaru spoiny także i w tym przypadku uzys-



Rys.1. Grubość spoin pachwinowych

kuje się taką samą wytrzymałością zmęczeniową, jak dla spoin wykonanych ręcznie.

W tabelicy 1 zestawiono wartości wytrzymałości zmęczeniowej dla materiału rodzimego i złączy spawanych wykonanych ręcznie, automatycznie łukiem krytym i w osłonie CO₂. Wytrzymałość zmęczeniowa wyznaczona została przy charakterystyce cyklu $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = + 0,2$ i $N = 2 \cdot 10^6$ zmian obciążenia.

Tabela 1

Wytrzymałość zmęczeniowa stali i złączy spawanych

	Gatunek stali				
	St37S	St3SX	St52	18G2A	10H
Wytrzymałość zmęczeniowa materiału rodzimego Rzõ w kg/mm ²	26 ^{xx)}	-	27	20 ^{x)}	32
Wytrzymałość zmęczeniowa złączy czółowych Rzõ w kg/mm ² spawanych:					
a) ręcznie	17 ^{xx)}	-	18	19	18
b) automatycznie łukiem krytym	18 ^{xx)}	-	21	-	17
c) w osłonie CO ₂	-	17	-	18	-
Wytrzymałość zmęczeniowa złączy krzyżowych Rzõ w kg/mm ² spawanych:					
a) ręcznie	9 ^{xx)}	-	7	-	9
b) automatycznie łukiem krytym	13,7 ^{xx)}	-	11,5	-	10,5
c) w osłonie CO ₂	-	9	-	10	-

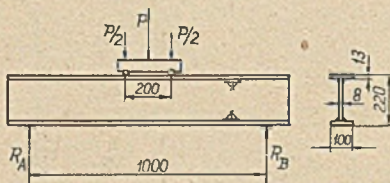
x) Brzegi cięte półautomatycznie tlenem.

xx) Wytrzymałość zmęczeniowa określana przy $\sigma_{\min} = 2 \text{ kg/mm}^2$.

Z tablicy 1 wynika, że wytrzymałość zmęczeniowa złączy z różnych stali konstrukcyjnych, niezależnie od metody spawania jest prawie taka sama. Nieco wyższą wytrzymałość zmęczeniową złączy czołowych ze stali St52 wykonanych automatycznie łukiem krytym można wytłumaczyć bardzo małym nadlewem i łagodnym przejściem lica spoiny do materiału rodzimego. W złączach krzyżowych, wykonanych automatycznie łukiem krytym wytrzymałość zmęczeniową określono bez uwzględnienia rzeczywistego wymiaru spoiny.

Badania zmęczeniowe prowadzone na małych próbkach nie odzwierciedlają rzeczywistej pracy elementów lub zespołów elementów konstrukcyjnych, obciążonych siłami zmiennymi. Dlatego też szereg badań prowadzi się ostatnio na modelach lub też gotowych elementach, a nawet całych konstrukcjach obciążonych siłami zmiennej wielkości, które doprowadza się do zniszczenia dla stwierdzenia zachowania się różnych rozwiązań konstrukcyjnych pod wpływem tych sił.

W zakresie badań zmęczeniowych elementów spawanych, ustalono wpływ grubości spoin pachwinowych łączących środnik z pasami, wpływ przyspawania usztywnień do rozciąganych pasów oraz wpływ spoin przerywanych na wytrzymałość zmęczeniową belek spawanych. Wymiary i sposób obciążenia belki podano na rys.2, zaś rodzaje belek do badań na rys.3. Przeprowadzone badania zmęczeniowe belek usztywnionych żebrami wykazały że:

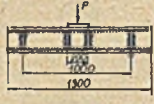




Rys.2. Wymiary i sposób obciążenia belki

- badane belki, w których naprężenia przekroczyły granicę plastyczności uległy zniszczeniu po około $0,5 \cdot 10^6$ zmian obciążenia,
- w belkach w których żebra przyspawano spoinami pachwinowymi do pasa rozciąganego, pęknięcia występowały przeważnie w przejściu tych spoin do materiału pasa,
- nie stwierdzono zasadniczych różnic między wytrzymałością zmęczeniową dla badanych trzech typów belek.

Wszystkie belki pękały przy naprężeniu $\sigma_g = 21,1 \text{ kg/mm}^2$ po okoóo $1,5 \cdot 10^6$ zmian obciężenia.

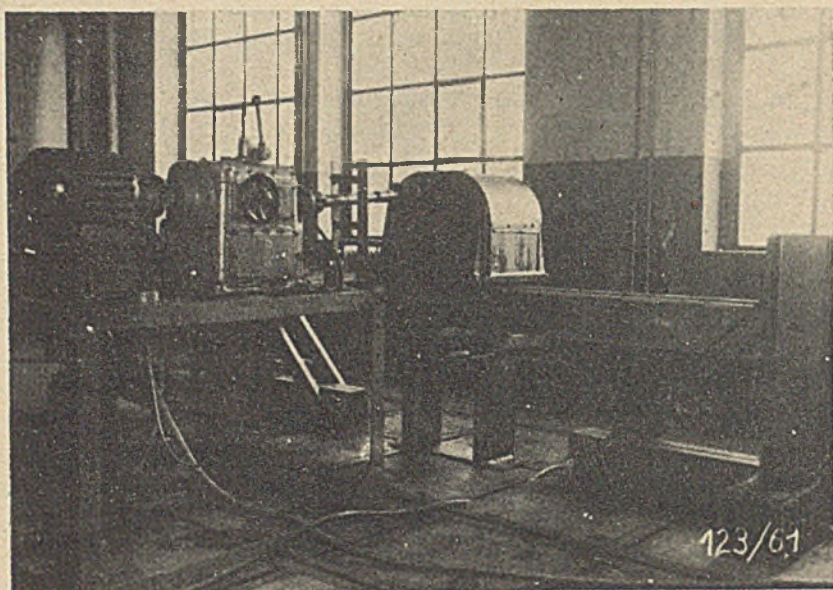
Dla belek ze spoinami przerywanymi, spawanych póóautoma-
tycznie łukiem krytym otrzymano $R_{g0} = 18 \text{ kg/mm}^2$, zaś spawa-
nych elektrodami zasadowymi $R_{g0} = 17,8 \text{ kg/mm}^2$. We wszyst-
kich badanych belkach pęk-
nięcia miały swój póczátek
od kraterów spoin przerywa-
nych i rozprzestrzeniały się
najpierw w srodku, prze-
biegajác najczęściej ukoś-
nie w kierunku pasa górnego.
Elementy spawane ze stopów
aluminium w przypadku dzia-
łania obciężen zmiennych za-
chowują się podobnie jak
elementy ze stali, z tą tyl-
ko róónicą, że wytrzymaóóó
zmczeniowa elementów ze
stopów aluminium jest nióósza.
W tablicy 2 zestawiono wy-
trzymaóóó zmczeniową be-
lek o przekroju dwuteowym,
z blach o gruboóci 6 mm, wy-
konanych ze stopu AlMg5MnCr.

Seria	Szkic, wymiary oraz gruboóó spoin
I	 <p>Żebra przyspawane do srodnika pasa górnego i dolnego. Spoiny pachwinowe łączące srodek z pasami $a = 3 \text{ mm}$. Spoiny łączące zebra ze srodkami i pasami $a = 3 \text{ mm}$.</p>
II	 <p>Żebra przyspawane tylko do srodnika i pasa górnego. Gruboóó spoin jak w serii I.</p>
III	 <p>W pasie dolnym zebra przyspawane do podkadek o wymiarze $40 \times 35 \times 8 \text{ mm}$ nie przyspawanych do pasa. Gruboóó spoin jak w serii I.</p>

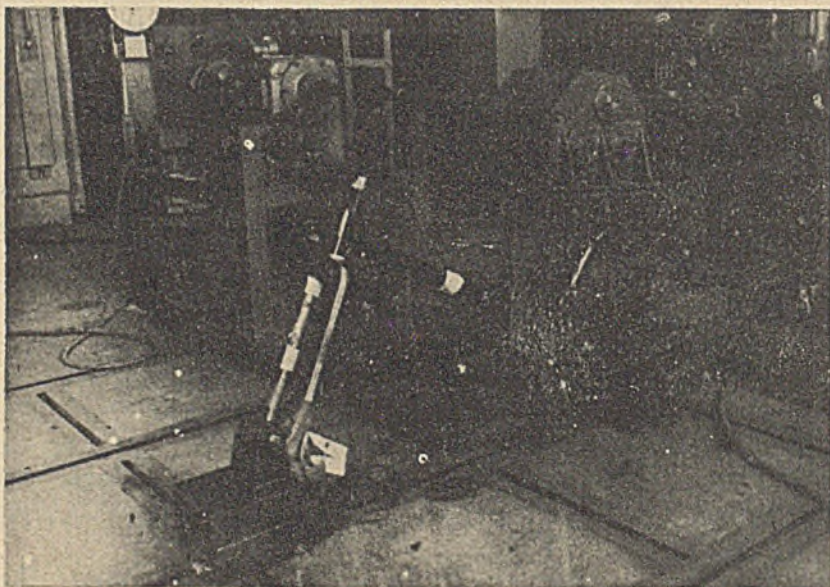
Rys.3. Wymiary i rodzaje belek do badań

rys.4. Badana belka ułożona jest na dwóch podporach: stałej i przesuwnej. Na belce zamocowany jest wibrator napędzany silnikiem elektrycznym poprzez bezstopniową przekładnię. Iloóó zmian obciężenia rejestruje licznik póółączony z wałem wibratora. Stanowisko badawcze ustawione jest na specjalnej płycie fundamentowej, podwieszanej na sprężynach. Obciężenie belki wibratorem jest obciężeniem stałym, na które nakłada się obciężenie zmienne, wywołane obrotem mimoóórodowo zamocowanych mas na wale wibratora. Pod wpóóływem zwięószczenia liczby obrotów następuje ugięócie belki, mierzone za pomócóó klina optycznego, zamocowanego w jej srodku. Mając zmierzóną strzałkę ugięócia z przeliczeń wytrzymaóóóciowych dochodzi się do napręóen.

Ostatnio obserwuje się coraz częóstsze zastosowanie przekrojów rurowych w budowie dźwignic. W celu ustalenia wytrzymaóóci zmczeniowej typowych rozwięózań konstrukcyjnych węó-



Rys.4. Stanowisko do badań zmęczeniowych belek ze stopu $AlMg5MnCr$



Rys.5. Stanowisko do badań ram motoroweru "Komar"

ków podjęto badania zmęczeniowe na kratownicach płaskich o wymiarach dostosowanych do maszyny wytrzymałościowej. Wyniki badań zestawiono w tablicy 3.

Tablica 2

Wytrzymałość zmęczeniowa belek spawanych ze stopu
AlMg5MnCr

Lp.	Opis przekroju	Z_{go} kg/cm ²	U w a g i
1	Przekrój dwuteowy - spoiny ciągłe dwustronne	400	Z_{go} wyznaczono przy $N = 5 \cdot 10^6$ i $\sigma_{st} = 72$ kg/cm
2	Przekrój dwuteowy - spoiny ciągłe jednostronne	300	
3	Przekrój dwuteowy - spoiny przerywane o wymiarze $\Delta 3 \times 80 \underline{Z} 160$	250	
4	Przekrój dwuteowy - w środku belki styk doczołowy w pasie górnym i dolnym	250	
5	Przekrój dwuteowy - w środku belki wspawana przepona	350	



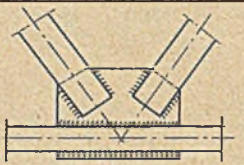


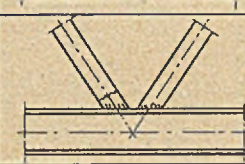

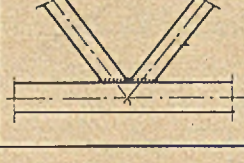
W toku badań oraz na podstawie pomiarów tensometrycznych stwierdzono, że duża sztywność węzłów wywiera zasadniczy wpływ na wyniki badań. Niemniej jednak przeprowadzone badania umożliwiają porównanie wytrzymałości zmęczeniowej połączeń spawanych przy różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych węzłów i pozwalają wybrać najkorzystniejsze rozwiązanie węzła dla elementów kratowych, pracujących przy obciążeniach zmiennych.

Ramy pojazdów jednośladowych są konstrukcjami eksploataowanymi w bardzo trudnych warunkach. Niedostateczna jakość wykonania połączeń, a nieraz niewłaściwe rozwiązania konstrukcyjne są powodem powstawania pęknięć zmęczeniowych. W celu określenia trwałości ram motorowerów i motocykli, a zarazem ustalenia najsłabszych miejsc w tych konstrukcjach przeprowadzo-

ne zostały badania zmęczeniowe ram motorowerów "Rys", "Żak" i "Komar" oraz motocykli "SHL"-175 i "Junak".

Tablica 3

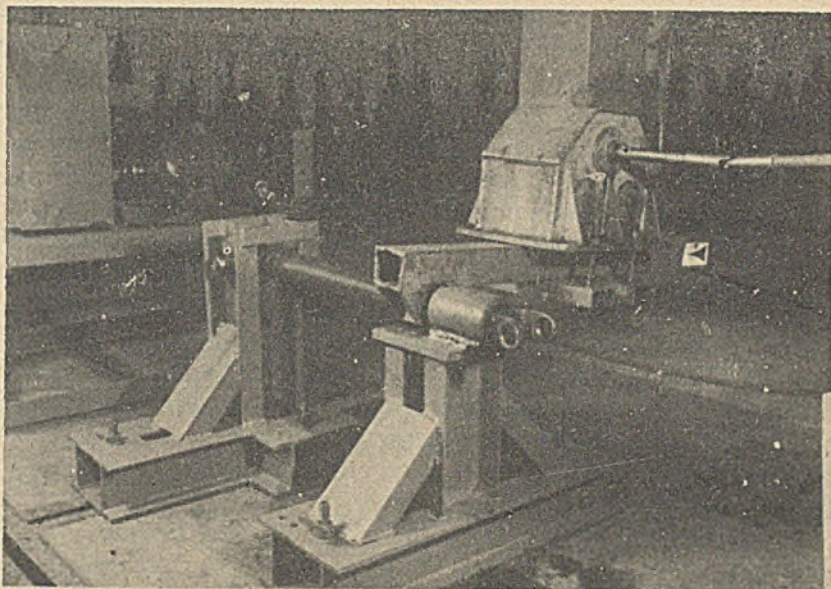
Wytrzymałość zmęczeniowa węzłów spawanych z rur

L.p.	Rozw. konstr. węzła	Zrj (kg/mm ²)	L.p.	Rozw. konstr. węzła	Zrj (kg/mm ²)
1		~8,5	4		~6,5
2		~4,5	5		~7,5
3		~4,5	6		~6,0

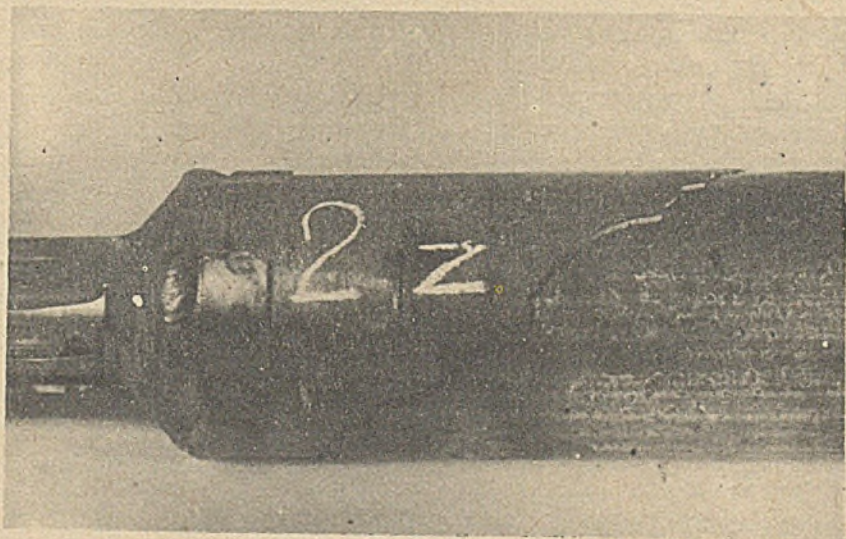
Stanowisko do badań ram motoroweru "Komar" pokazano na rys.5. Przód ramy zamocowany jest na podporze stałej, tył zaś na podporze przesuwnej. Ramę obciąża się obciążeniem stałym, na które składa się ciężar kierowcy i pasażera, bagaż, silnik, zbiornik z paliwem oraz siłę zmienną wywołaną wirującymi masami wibratora. Ilość zmian obciążenia do momentu pęknięcia rejestruje licznik. Badania prowadzi się zwykle w pobliżu rezonansu ramy. Naprężenia od obciążenia statycznego i zmiennego w miejscach najsłabszych mierzy się za pomocą tensometrów oporowych.

We wszystkich pojazdach jednośladowych, najbardziej obciążonym elementem jest główka ramy. Tam też najczęściej powstają pęknięcia zmęczeniowe podczas eksploatacji pojazdu. Ponieważ wytrzymałość zmęczeniowa w dużym stopniu zależy od jakości wykonania spoin, należy te połączenia wykonywać w warsztacie bardzo starannie.

Wały pędne do samochodów ciężarowych składające się z wieloklina, rury i tulei przegubu są elementami spawanymi. Wieloklin wału wykonany jest ze stali 40H o zawartości węgla C = 0,37%. Spawanie wieloklina z rurą bez wstępnego



Rys.6. Stanowisko do badań zmęczeniowych wałów próbnych



Rys.7. Pęknięcie zmęczeniowe wału

podgrzewania może spowodować powstawanie pęknięć, które z kolei podczas eksploatacji mogą doprowadzić do poważnej awarii pojazdu. Przy opracowywaniu technologii spawania podjęto również badania zmęczeniowe wałów. Badania przeprowadzono na stanowisku rys.6. Wał zamocowany jest w dwóch podporach. Na wieloklin nałożono belkę z przymocowanym wibratorem. Pod wpływem zwiększenia ilości obrotów mas wirujących, zwiększa się zmienny moment zginający, powodujący skrećanie wału. Badania zmęczeniowe przeprowadzono na wałach z podgrzewaniem wstępnym i bez podgrzewania. Wały spawane na zimno miały na obwodzie przyzgrzewane nakładki wyważające. We wszystkich przypadkach pęknięcia powstawały od zgrzein łączących te nakładki z rurą. Na rys.7 pokazano pęknięcie wału wychodzące od zgrzeiny. Zgrzanie nakładki do rury wprowadza ją do współpracy z rurą powodując koncentrację naprężeń i wcześniejsze zniszczenie elementu.

W pracach Instytutu Spawalnictwa ciągle rozszerza się zakres badań zmęczeniowych. W roku bieżącym prowadzone są badania zmęczeniowe elementów nowego autobusu SAN w wersji zgrzewanej. Zakupione w NRD obciążniki hydrauliczne umożliwiają prowadzenie badań zmęczeniowych większych konstrukcji. Prowadzi się również badania na nowym stopie $AlZnMg$, a także na elementach maszyn rolniczych. Wyniki tych badań będą opublikowane w Biuletynie Informacyjnym Instytutu Spawalnictwa lub w Przeglądzie Spawalnictwa.